

会議のトピックス

Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei (Sakura-2019)

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター・重元素核科学研究グループ

西尾 勝久

nishio.katsuhisa@jaea.go.jp

1. 会議の趣旨

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター (ASRC; Advanced Science Research Center) は、各研究分野における国際的レベルでの COE を目指す取り組みの一環として、黎明研究制度を設けている。提案された研究テーマに対し、先端基礎研究センターと国内外の研究機関との間で研究取り決めを行い、機関と国籍の枠を超えた協力体制を整えることで、研究を有利に進めるのが目的である。この制度では、国際会議を開催することが推奨されており、当グループでも 2012 年から毎年、核分裂および関連する研究分野をテーマとする国際会議を開催してきた。今回 8 回目となる研究会「第 54 回 ASRC International Workshop Sakura-2019 “Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei”」は 2019 年 3 月 25-27 日に原子力機構・原子力科学研究所 (東海) にある先端基礎研究センターで開催した。ちょうど桜が開花する時期で、印象的な会議名にしようと考え Sakura-2019 と名前を付けた。

会議の話題として、核分裂、超重元素、核融合反応や多核子移行反応、エキゾチック原子核の構造などを取り上げた。3 日間の会議プログラムを 50 名の口頭発表者で組み、このうち外国機関からの発表者数は 36 名となった。

核分裂の発見から 80 年が経過した。近年、新たな核分裂測定方法が開拓され、より多くのデータが取得されるようになった。特に、これまで限られた領域の原子核が測定対象核種となっていたが、2010 年に陽子数の過剰な水銀原子核 ^{180}Hg の低エネルギー核分裂で質量非対称な核分裂が発見されるなど、核分裂測定は大きな広がりを示している[1]。また、逆運動学法を用いた測定[2,3]、多核子移行反応の導入[4,5]などにより、従来では不可能だった多様なデータが供給されるようになった。近年の核分裂実験については、筆者らがまとめたレビュー論文がある[6][7]。図 1 は、2017 年までに測定された低エネルギー核分裂データ (励起エネルギーが核分裂障壁の高さ +10MeV 未満) を示す。核分裂理論もここ 10 年で大きく進展し、現在ではウランなど低エネルギー核分裂のデータを再現で

きる模型が開発された。他の分野との関係では、例えば自然界での元素合成、特に超新星爆発や中性子星の合体現象の爆発的環境における速い元素合成過程 (r -プロセス) では、中性子過剰なアクチノイド原子核や超重元素同位体の核分裂で生成される核分裂片が反応に組み込まれる“核分裂リサイクル”の議論が活発になっており、本会議でも議論された。また、超重元素領域では、118 番元素を超える新元素合成の取り組みが紹介された。このような話題性の高い研究を最前線で牽引している研究者に集まってもらうことができ、有意義な会議となった。会議で発表されたスライドは、ホームページで参照できる。

<https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/HENS-gr/workshop9/index9.html>

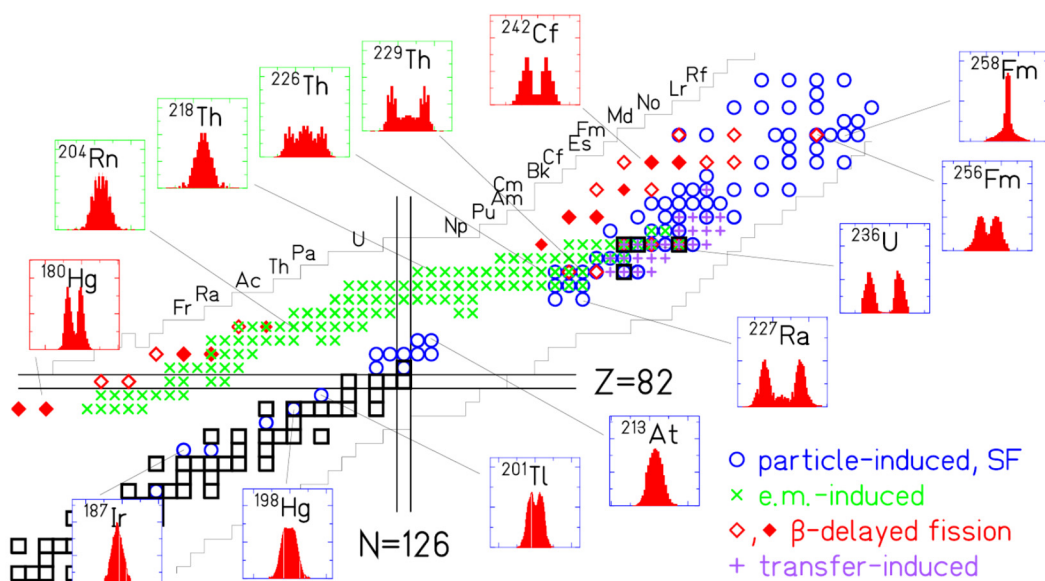


図1 2017年までに取得された核分裂データ [6]

2. 会議の内容

以下、会議で行われた内容の詳細は、ホームページと発表者のスライドを参照していただくとして、ここでは2つの話題を取り上げて紹介する。

(1) フェルミウム領域の核分裂

いまから40年ほど前、米国で興味深い自発核分裂が発見された[8]。フェルミウム ^{257}Fm では、ウランのようによく知られた質量非対称分裂を示すのに対し、 ^{258}Fm では対称核分裂となり、しかも質量数分布の形状は鋭く際立ったピーク構造を示した。それ以来、中性子過剰なフェルミウム領域の核分裂実験は、検証実験も含めて行われることはなかった。理由の一つに、この領域の核分裂を調べるには、アインスタイニウム 254 (^{254}Es , 半減期 276 日、原子番号 99) 標的を用いた核反応でこれら原子核を合成する必要があるためであ

り、そのような実験が実現しなかったためである。 ^{254}Es は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) のハイフラックス同位体炉でのみ生成されるが、ここで ^{254}Es は、産業利用価値がある ^{252}Cf を合成するプロセスの副産物として生成される。昔は $40\mu\text{g}$ 程度生成された時期があったようだが、現在では、できるとしても1年程度をかけたサイクルの運転で $1\mu\text{g}$ とわずかな量であり、このような微量の試料でも実験が可能なセットアップを構築する必要がある。このような背景もあり、ORNL では2004年以降、Esの抽出は行われなかったようである。

原子力機構はORNLと交渉、米国エネルギー省の許可も得て、 $0.5\mu\text{g}$ の ^{254}Es を2017年に取得し、東海にあるタンデム加速器で実験を開始した。タンデムで得られるビームは直径 1.0 mm とシャープであり、これに合わせて直径 1.0 mm の薄膜標的を作成する。ビームスポットが変動しない静電型加速器の特徴が不可欠である。2018年にかけて ^{258}Fm の自発核分裂、および ^4He を ^{254}Es に照射することで ^{258}Md (メンデレビウム) の核分裂データを取得し、この実験結果が会議で紹介された。原子力機構では、2019年にも2回目となる ^{254}Es を入手、2020年の現在、多核子移行反応を用いた核分裂データの取得を行うとともに、インビーム核分光実験手法を用いたフェルミウム領域の原子核構造研究を進めている。



図2 会議の集合写真

(2) 非対称核分裂の起源

理論の進展の話題の一つに、アクチノイド原子核の非対称核分裂の起源について紹介があった。Nature に出版されている成果[9]であるが、この考え方は ^{180}Hg についても適用可能である、というものであり、以下に説明する。

ウラン 236 などアクチノイドの核分裂が非対称性を示す説明の一つとして、重い核分裂片には 2 重魔法数核 ^{132}Sn (陽子数 $Z=50$ 、中性子数 $N=82$) に接近するものがあり、これを生成するように非対称核分裂が生じる、というものがある。一方、実験では、陽子数 52~56 を持つ核分裂片が多く生成されており、 $Z=50$ の役割は小さく見える。Scamps (当時・筑波大学) と Simenel (オーストラリア国立大) は、原子核の 8 重極変形 (Octupole deformation)、すなわち”洋なし形“の役割に着目した。重い核分裂片のうち、たとえば $^{144,146}\text{Ba}$ ($Z=56$) が変形すると、洋なし型に変形した方がエネルギー的に安定になる。核分裂を考えると、サドル点近傍まで原子核が変形すると、 $^{144,146}\text{Ba}$ ($Z=56$) で代表される原子核が洋なし型の変形を好み、このためこれらを生み出すように非対称核分裂が出現する。理論では、洋なし型への変形パラメータを導入することで $Z=52$ と 56 において殻エネルギーギャップが成長し、核分裂をドライブする構造が見られた。一方、球形で閉殻をとる ^{132}Sn などは洋なし型に変形しにくく、結果として核分裂片として生成されにくい。理論は、 Th ($Z=90$) から Cf ($Z=98$) で実験的に得られている核分裂片の陽子数 (Z) に対する収率をうまく説明した。

さて、 ^{180}Hg の核分裂はどうか。ここでは、 ^{132}Sn も $^{144,146}\text{Ba}$ も関与することはできない。実験では、 ^{180}Hg が核分裂すると、質量数 80 と 100 の核分裂片が生成されており、 ^{80}Kr ($Z=36, N=44$) と ^{100}Ru ($Z=44, N=56$) が最も生成される核分裂片である。Scamps と Simenel の ^{180}Hg の計算によれば、洋なし型を好む原子核は、軽い方にも重い方にもある。つまり、 $N=56$ を持つ重い核分裂片 (Ru)、 $Z=36$ を持つ軽い核分裂片 (Kr) が ^{180}Hg の非対称核分裂を支配しているようだ。興味深いことに、 Ru は β_2 変形が小さい所ですでに β_3 変形を好む。一方、 Kr は β_2 が大きくなって初めて洋なし型に成長できる。核分裂でいうと、重い核分裂片は球形に近い形で生まれ、軽い核分裂片は大きく変形した形で生まれる。

著者らが ^{180}Hg の核分裂を調べる議論を始めたころ、この核分裂では ^{90}Zr ($Z=40, N=50$) 原子核を 2 つ生成するに違いないと考えたが、実際は質量数 80 と 100 に分かれた。魔法数 50 と準魔法数 40 を有する ^{90}Zr が関与しない核分裂ということで、論文タイトル“New Type of Asymmetric Fission in Proton-Rich Nuclei”をつけたが、上の考え方で言えば、アクチノイドと共通した概念で説明できる。Möller は、8 重極変形がサドル点の構造に影響を及ぼすことを 1971 年に示している点を議論した [10]。

3. おわりに

近年の実験技術の進歩と理論研究の発展によって、核分裂現象がますますユニークな

研究対象になってきた。また、核分裂の理解は、自然界における r -プロセス元素合成の理解、および超重原子核の存在限界など、人類共通の興味といえる課題とも深くつながっている。会議では、参加者が自由に議論できる雰囲気づくりを目指した。今後も、このような会議を企画・運営したいと考えている。

参考文献

- [1] A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 252502 (2010).
- [2] K.-H. Schmidt et al., Nucl. Phys. A **665**, 221 (2000).
- [3] M. Caamano et al., Phys. Rev. C **88**, 024605 (2013).
- [4] R. Légouillon et al., Phys. Lett. B **761**, 125 (2016).
- [5] K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 222501 (2017).
- [6] A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Rep. Prog. Phys. **81**, 014301 (2018).
- [7] 西尾勝久, 千葉敏 日本原子力学会誌, Journal of Atomic Energy Society of Japan, ATOMOΣ **59**, 717 (2017)
- [8] D.C. Hoffman, Nucl. Phys. **A502**, 21c (1989).
- [9] G. Scamps and C. Simenel, Nature **564**, 382 (2018).
- [10] T. Ichikawa, P. Möller, Phys. Lett. B **789**, 679 (2019).